

铁路供电系统继电保护整定计算与配合策略优化

张 锋

重庆交通建设管理有限公司 重庆 401121

摘要: 伴随我国铁路路网规模持续扩容、高铁运行密度稳步攀升,铁路供电系统承载的负荷特性与故障形态愈发复杂,继电保护装置作为供电网络安全屏障,其整定计算精度与层级配合效果直接决定铁路行车供电稳定性。当前既有继电保护整定方案多依托传统经验参数开展核算,难以适配复杂工况下负荷波动、故障暂态冲击带来的运行偏差,层级配合中时常出现保护拒动、越级跳闸、动作时限不匹配等问题,严重威胁铁路供电系统安全稳定运行。本文立足铁路供电系统拓扑结构与故障特征,剖析现有整定计算方法存在的短板与层级配合失效的核心诱因,构建兼顾速动性、选择性、灵敏性与可靠性的整定计算优化模型,细化变电所、分区所、接触网等关键节点的保护配合逻辑,提出针对性极强的配合策略优化方案。依托实际线路开展仿真验证,结果表明,优化后的整定计算方案可显著提升故障识别精度,缩短故障切除时长,杜绝越级跳闸问题,为铁路供电系统安全可靠运行提供坚实技术支撑。

关键词: 铁路供电系统;继电保护;整定计算;层级配合;策略优化;故障防控

引言

铁路供电系统是铁路运输体系的核心动力命脉,承担着为机车牵引、车站运营、信号通信等关键环节持续供电的重要使命,其运行安全性与供电稳定性直接关乎铁路行车秩序与旅客生命财产安全。继电保护装置作为供电系统故障防控的第一道防线,需在故障发生瞬间精准识别故障点位、快速切除故障区段,最大限度缩小停电范围,保障非故障区段正常供电,而这一系列功能的实现,高度依赖精准的整定计算与严密的层级配合。伴随电气化铁路提速扩容、智能电网技术深度融合,铁路供电系统呈现出负荷波动大、拓扑结构复杂、故障类型多样的特征,传统继电保护整定计算多采用固定参数、简化模型开展核算,未充分考量线路阻抗变化、负荷冲击、分布式电源接入等多重因素影响,保护定值适配性不足,层级配合缺乏柔性调节机制。

一、铁路供电继电保护整定计算现存核心问题剖析

(一) 系统参数采集不全,模型构建精度不足

整定计算的核心前提是获取全面、精准的系统参数,而实际工程中,多数铁路供电系统参数采集存在严重缺失,直接导致整定模型失真,核算结果偏离实际。部分线路建设年代久远,线路阻抗、导线截面、绝缘子参数等基础资料缺失,运维阶段仅记录设备更换记录,未同步更新系统参数,整定计算只能依托估算值开展^[4]。现代铁路供电系统接入无功补偿装置、监控设备等辅助设

施,其阻抗、电容参数未纳入等效模型,分布电容电流、谐波干扰等因素被完全忽略,而这类参数在长距离供电线路中对故障电流分布影响极大,直接改变保护动作阈值。

机车冲击负荷带来的动态参数变化,更是现有整定模型未覆盖的空白区域。机车启动、制动时产生的冲击电流可达额定电流的3-5倍,伴随谐波分量与暂态过电压,传统静态模型仅采用额定负荷参数核算,未考量动态冲击对保护定值的影响,导致保护装置在正常负荷波动时误动,在真实故障工况下反而拒动。部分复杂供电区段采用混合供电方式,不同供电方式的参数耦合特性未被精准模拟,模型简化过度,无法反映真实故障电流分布,整定定值自然失去实际指导意义。

(二) 定值核算过于保守,保护灵敏度与速动性失衡

为规避保护拒动风险,现场整定计算普遍采用过度保守的核算思路,大幅放大保护定值裕度,看似提升了可靠性,实则打破了保护性能平衡,引发一系列连锁问题。核算过程中,多采用最大故障电流核算动作电流,未合理区分不同故障类型、不同运行方式的差异,定值设置偏大,对于高阻接地、轻微短路等故障,保护装置无法灵敏识别,出现拒动现象^[5]。部分区段为满足上下级配合时限要求,盲目延长后备保护动作时限,虽避免了越级跳闸,却违背了速动性准则,故障切除时长超标,导致设备烧毁、故障扩大化。

这种保守化核算思路,本质是对故障特性与保护逻辑把控不足的妥协。铁路供电系统故障类型多样,过渡

电阻阻值范围跨度大，高阻接地故障电流仅为常规短路故障的1/5-1/10，传统定值无法覆盖此类微弱故障，而过度放大定值又会引发正常工况误动。速动性与灵敏度的平衡，是继电保护的核心难题，现有核算方法未能建立动态调节机制，要么牺牲灵敏度保障速动性，要么牺牲速动性保障选择性，无法实现多重性能的协同优化，难以适配复杂故障场景。

（三）层级配合逻辑混乱，越级跳闸风险突出

铁路供电继电保护采用多级联动架构，上下级保护、相邻保护之间需形成精准的阶梯式配合，一旦配合逻辑紊乱，极易引发越级跳闸，扩大停电范围。当前层级配合存在的核心问题，在于时限配合不合理、电流定值无梯度、保护范围重叠缺失。上下级保护动作时限差设置不规范，常规电力系统时限差多设置为0.5s，而铁路供电系统负荷波动大、故障传导快，过小时限差易引发越级跳闸，过大时限差又无法满足速动要求，现场多数线路未根据线路特性微调时限差，统一采用固定数值，适配性极差^[6]。

保护范围配合存在明显漏洞，上级保护范围与下级保护范围重叠过多，会导致故障发生时上下级保护同时启动，引发误动；保护范围存在空白区段，会导致区间故障无保护覆盖，出现拒动。不同类型保护装置之间配合缺失，电流保护、距离保护、零序保护之间逻辑独立，未建立联动机制，单一保护故障时，后备保护无法及时补位。加之部分线路改造后，仅调整局部保护定值，未开展全线路配合校验，新旧定值冲突，配合时序完全打乱，越级跳闸风险居高不下，成为铁路供电故障的主要诱因。

（四）整定计算流程不规范，后期校验维护缺失

继电保护整定计算并非一次性工作，需根据系统运行方式、设备参数变化定期核算、校验、调整，而实际运维中，整定计算流程极不规范，后期维护工作严重缺位。新建线路整定计算多依托设计单位完成，未结合现场实际工况开展复核，设计定值与现场运行需求脱节，投运前未开展模拟故障校验，直接带负荷运行，埋下先天隐患^[7]。投运后，系统参数调整、设备更换、线路改造后，未及时重新核算保护定值，依旧沿用初始定值，定值与现有系统完全不匹配。

整定计算资料管理混乱，定值单、核算过程、校验记录缺失归档，后续维护无据可依，运维人员仅凭经验微调定值，随意性极强。缺乏常态化校验机制，未定期开展模拟故障测试、定值核对工作，保护装置隐性故障

无法及时发现，直至故障发生才暴露整定问题。部分运维单位过度依赖设备厂家，缺乏自主整定、校验能力，厂家定值未结合线路特性优化，通用性强、针对性弱，无法满足铁路供电专属需求。

二、铁路供电继电保护整定计算优化方案

（一）完善参数采集体系，构建高精度动态等效模型

为破解整定计算精度不足的问题，需构建全维度参数采集体系，摒弃简化建模思路，建立贴合实际工况的动态等效模型。全面梳理铁路供电系统基础资料，对老旧线路开展现场实测，精准采集线路阻抗、导线参数、变压器变比、无功补偿装置等基础数据，建立数字化参数档案，并实时更新设备更换与线路改造后的参数变化。引入线路参数测试仪、电能质量分析仪等设备，实测分布电容、谐波含量、暂态阻抗等动态参数，将辅助设备阻抗、过渡电阻阻值范围纳入模型，还原系统真实特性。同时，构建动态自适应等效模型，区分最大、最小运行方式，常态与冲击负荷运行等多种工况，融合机车运行特性、季节性负荷波动及气象条件，实现模型参数随工况动态调整。利用电磁仿真软件搭建全线路模型，模拟各类故障场景，核算不同工况下故障电流与电压变化规律，为整定计算提供精准数据支撑。针对混合供电方式及长距离线路，建立多区段耦合模型，精准模拟故障传导特性，消除模型简化带来的核算误差，为精准整定奠定基础。

（二）优化定值核算算法，平衡多重保护性能

摒弃传统保守化核算思路，采用自适应整定算法，根据故障类型、运行方式动态调整保护定值，实现灵敏度、速动性、选择性、可靠性的协同优化。针对不同故障类型差异化设置定值，对于高阻接地、轻微短路等微弱故障，降低动作电流定值，提升保护灵敏度；对于大电流短路故障，适当提升定值，规避冲击负荷干扰，确保不误动。引入模糊控制理论，结合故障电流大小、过渡电阻阻值、负荷波动幅度，自动调节保护动作阈值，无需人工微调，适配全场景故障需求。

合理设置定值裕度，摒弃盲目放大裕度的保守做法，依据系统参数偏差范围、设备测量误差，科学设定裕度系数，兼顾故障识别可靠性与保护灵敏度。优化动作时限核算方法，采用分段阶梯式时限设置，靠近故障点的下级保护采用最短时限，上级保护逐级递增时限，时限差结合线路长度、故障传导速度精准设定，高铁线路时限差控制在0.3-0.4s，普速铁路控制在0.4-0.5s，既满足速动要求，又杜绝越级跳闸。针对牵引负荷冲击特性，

增设负荷闭锁环节,区分冲击负荷与真实故障,避免正常负荷波动引发保护误动。

(三) 推行全流程规范化管控,强化后期校验维护

建立标准化整定计算流程,明确设计、复核、校验、投运、维护全环节责任,杜绝随意整定、盲目调整定值现象。新建线路整定完成后,开展现场模拟故障校验,通过仿真测试与实地测试双重验证,确保保护定值精准可靠,投运前完成全线路配合校验,消除定值冲突问题。建立定值单终身管理机制,详细记录核算过程、参数依据、调整原因,统一归档保管,实现定值调整全程可追溯。

制定常态化校验维护制度,每季度开展一次保护定值核对,每年开展一次全线路模拟故障校验,系统参数调整、设备更换、线路改造后,72小时内完成重新整定与校验。提升运维人员专业能力,开展整定计算、故障分析、校验维护专项培训,培养自主整定、自主校验能力,摆脱对厂家的过度依赖。搭建数字化整定管理平台,实现参数采集、定值核算、配合校验、维护记录一体化管理,自动预警定值偏差、超期未校验问题,提升整定管理智能化水平。

三、铁路供电继电保护层级配合策略优化

(一) 理顺多级保护配合逻辑,构建精准阶梯配合体系

立足铁路供电系统多级架构,理顺牵引变电所、分区所、接触网、配电所之间的保护配合关系,构建层级清晰、时序精准的阶梯式配合体系,杜绝越级跳闸风险。明确各级保护责任边界,下级保护负责本级区段故障快速切除,上级保护仅在下级拒动时动作,保护范围严格限定,避免重叠过多与空白区段。按照“下级优先、逐级后备”原则,从接触网到分区所、牵引变电所逐级递增动作时限,形成完整时限阶梯,确保故障时最靠近故障点的保护装置优先动作。细化电流定值配合梯度,下级保护动作电流小于上级,故障电流满足下级启动条件时上级不动作,仅当下级拒动、故障持续存在时上级延时启动。针对长距离供电线路,增设中间保护环节,拆分过长保护范围,缩小单一保护覆盖区域,提升故障定位精度与切除速度。优化相邻线路保护配合逻辑,明确故障方向判别准则,杜绝相邻线路故障引发误动,实现故障区段精准隔离。

(二) 强化多类型保护联动配合,提升故障应对能力

打破单一保护独立运行的局限,强化电流保护、距离保护、零序保护、纵差保护之间的联动配合,构建多

维度、全方位保护体系,提升复杂故障应对能力。主保护采用速动性强的纵差保护、距离Ⅰ段保护,实现故障瞬时切除;后备保护采用时限配合的电流保护、距离Ⅱ段保护,作为主保护的冗余补充,主保护拒动时快速启动。针对高阻接地故障,增设零序保护、小电流接地选线装置,与主保护联动运行,精准识别微弱故障信号,弥补常规电流保护的灵敏度不足。

建立保护联动闭锁机制,正常运行时,各类保护互不干扰;故障发生时,主保护优先启动,同时闭锁非相关保护,避免误动。针对机车冲击负荷、谐波干扰,增设滤波、闭锁环节,防止异常信号误导保护动作。对于环状供电线路,优化备自投装置与继电保护配合逻辑,故障切除后快速恢复非故障区段供电,兼顾故障隔离与供电连续性,实现故障防控与供电保障的双重目标。

结论

综合来看,本文提出的优化方案,摒弃了传统研究重局部、轻整体的弊端,兼顾理论严谨性与工程实用性,可有效提升铁路供电继电保护性能,降低故障发生率,保障铁路行车供电安全。后续研究可进一步结合人工智能技术,实现故障智能识别、定值自动整定、配合实时调节,推动铁路供电继电保护向智能化、自适应化方向升级,为我国铁路事业高质量发展筑牢供电安全屏障。

参考文献

- [1]钟成,张晓鹏,邓国平,代雪峰,刘果,王艳玉.电气化铁路末端串联补偿牵引网继电保护研究[J].中国铁路,2022,54(12):69-75.
- [2]程彩虹.高速铁路牵引变电所继电保护方案优化研究[J].中国铁路,2021,49(04):85-91.
- [3]康正波.电气化铁路供电体系中继电保护整定分析[J].电力设备管理,2023(14):164-166.
- [4]邵明.智能牵引变电所站域后备保护系统研究[J].铁道工程学报,2022,39(08):75-80.
- [5]杨中群.高速铁路牵引变电所继电保护方案优化研究[J].电力设备管理,2023(11):271-273.
- [6]唐德银.高速铁路牵引变电所常见设计、施工问题研究[J].中国设备工程,2023(16):110-112.
- [7]文稳利.牵引变电所27.5kV所用变压器电能净化研究[J].铁路技术创新,2022(02):30-34.
- [8]苏继东.高铁航空港牵引变电所功率因数不达标分析及治理[J].中国铁路,2023,55(11):118-124.